

**Д. Ю. Распосиенко\*, Л. И. Кайгородова, В. Г. Пушин, А. В. Лукьянов**

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

\*dmitrijrasp@gmail.com

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СУБМИКРО- И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В АЛЮМИНИЙ- ЛИТИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ МЕГАПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

С помощью методов просвечивающей электронной микроскопии изучено влияние химического состава сплавов системы Al-Cu-Li на образование в них нанокристаллической структуры после мегапластической деформации кручением под высоким давлением и последующего отжига. Выявлено, что размерная стабильность зеренной структуры наноструктурированных сплавов обусловлена барьерным эффектом выделяющейся гетерогенно стабильной мелкодисперсной фазы  $T_2$ .

*Ключевые слова:* мегапластическая деформация, кручение под высоким давлением, отжиг, рекристаллизация, нанокристаллическая структура, распад пересыщенного твердого раствора, фаза.

**D. Y. Rasposienko, L. I. Kaigorodova, V. G. Pushin, A. V. Luk'yanov**

## FEATURES OF SUBMICRO- AND NANO- CRYSTALLINE STRUCTURE IN AL-LI-ALLOYS UPON MEGA PLASTIC DEFORMATION

The effect of chemical composition on formation of nanocrystalline structure in Al-Cu-Li alloys subjected to severe plastic deformation by high-pressure torsion and subsequent annealing is investigated by methods of transmission electron microscopy. It has been shown that size stability of nanocrystalline structure is caused by the barrier effect of the finely heterogeneously dispersed stable  $T_2$ -phases.

*Keywords:* severe plastic deformation, high pressure torsion, annealing, recrystallization, nanocrystal structure, decomposition of the supersaturated solid solution phase.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния состава сплавов на основе системы Al-Cu-Li на образование в них нанокристаллической (НК) структуры. Для этого электронно-микроскопически изучали структуру различных сплавов после мегапластической деформации (МПД) и последующего отжига при температуре 150 °С в течение 15 ч. Состав сплавов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сплавов, мас. %

Марка сплава	Cu	Li	Zr	Sc	Mg	Ag	Zn	Al
1450	3,1	2,0	0,1	—	—	—	—	—
1450 (Sc + Mg)	3,1	2,0	0,1	0,08	0,96	—	—	—
1469	3,2	1,2	0,09	0,11	0,3	0,4	—	Ост.
1461	2,8	1,8	0,08	0,09	0,5	—	0,66	—

Из таблицы видно, что сплавы различаются как содержанием основных легирующих компонентов Li и Cu, так и малыми добавками Sc, Mg, Ag.

Для НК-структуры закаленные образцы сплав подвергались МПД кручением под давлением в наковальнях Бриджмена при комнатной температуре с последующим отжигом при температуре 150 °С в течение 15 ч. Используемые режимы МПД приведены в таблице 2. Расчет истинной деформации проводился для точек, лежащих на  $\frac{1}{2}$  радиуса образца.

Таблица 2

Режимы мегапластической деформации образцов сплавов

Давление Р, ГПа	4	4	4
Угол поворота $\varphi$ , $\pi$ рад	2	10	20
Истинная деформация $\epsilon$	7,0	8,6	9,3

Электронно-микроскопически обнаружили, что во всех исследуемых сплавах при отжиге образовалась рекристаллизованная структура. Степень ее дисперсности определялась составом сплава и величиной МПД. Так, в отожженном сплаве 1450 выявилась преимущественно субмикроструктурная зеренная структура. При повышении МПД посредством возрастания угла кручения  $\varphi$  от  $2\pi$  до  $20\pi$  рад диапазон размеров СМК-зерен изменился от 140–240 нм до 110–210 нм (рис. 1 а, б). Объемная доля зерен диаметром менее 100 нм (нанозерен) независимо от режима МПД незначительна.

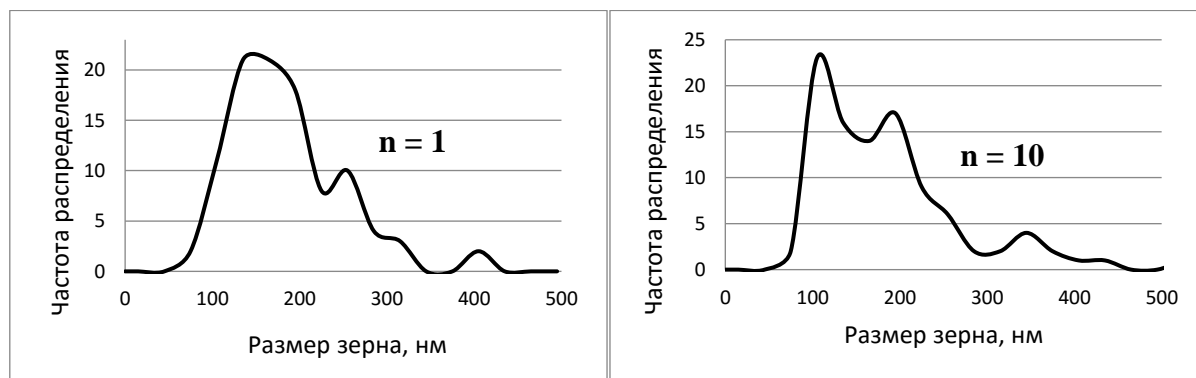


Рис. 1. Кривые частоты распределения зерен по размерам в сплаве 1450 после МПД и отжига

С целью увеличения дисперсности СМК-структуры сплав 1450 легировали комплексной добавкой Sc + Mg: добавка Sc является эффективным антирекристаллизатором деформируемых сплавов на основе Al, а добавка Mg стимулирует распад пересыщенных твердых растворов сплавов Al-Li. Полученные результаты показали, что легирование привело к увеличению дисперсности структурных составляющих: во-первых, резко возросла объемная доля нанозерен, а повышение МПД вызывало ее дополнительное увеличение (рис. 2). Во-вторых, в легированном сплаве уменьшился диаметр СМК-зерен – в случае МПД при  $\varphi = 2\pi$  рад преобладают зерна диаметром 125 нм, а при  $\varphi = 20\pi$  рад – 106 нм. При МПД  $\varphi = 10\pi - 20\pi$  рад в отожженном сплаве появилась бимодальность в распределении зерен по размерам, которая возрастает при увеличении МПД.

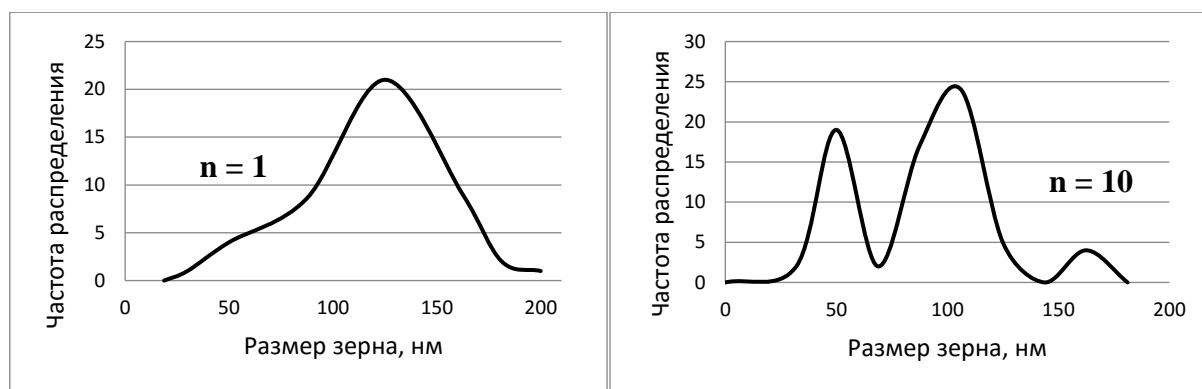


Рис. 2. Кривые частоты распределения зерен по размерам в сплаве 1450 с добавкой Sc и Mg после МПД и отжига

Исследование структуры сплава 1461, отличающегося от рассмотренного выше легированного сплава 1450 некоторым снижением содержания основных легирующих компонентов Li и Cu и наличием добавки Zn, выявило, что преимущественные размеры нано- и СМК-зерен в обоих сплавах находятся практически в одном диапазоне, но несколько изменилось соотношение их объемных долей (сравнить рис. 2 и 3). Видно, что увеличение угла  $\varphi$  от  $2\pi$  до  $20\pi$  рад вызвало измельчение нанокристаллической структуры (средний диаметр нанозерен уменьшился от 100 до 50–60 нм). В сплаве 1461 размерная бимодальность нанозерен выражена в меньшей степени, чем в легированном сплаве 1450. На основании электронно-микроскопического исследования заключили, что это связано с изменением объемной доли упрочняющей фазы  $T_2$  ( $Al_3CuLi_5$ ).

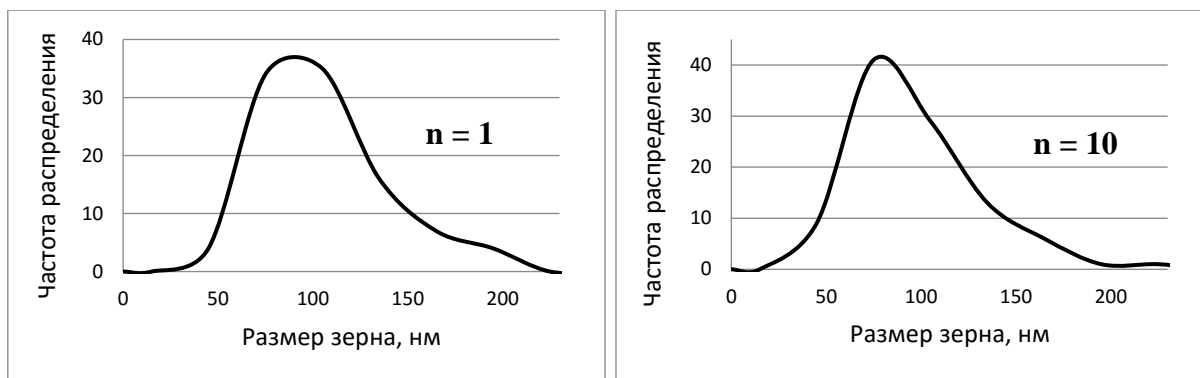


Рис. 3. Кривые частоты распределения зерен по размерам в сплаве 1461 после МПД и отжига

Значительное измельчение зеренной структуры (возрастание объемной доли и дисперсности нанозерен) наблюдали в сплаве 1469, что видно из сопоставления рис. 1, 2 и рис. 4. Проведенный электронномикроскопический анализ структуры показал, что это вызвано увеличением объемной доли гетерогенно зародившихся выделений фазы  $T_2$ . В отожженном сплаве дисперсные частицы фазы выделились на границах СМК- и нанозерен, оказывая барьерный эффект на их рост в процессе отжига. Ускорение кинетики распада пересыщенного твердого раствора по сравнению со сплавами 1450 и 1461, несмотря на большее пересыщение последних основными легирующими компонентами, по-видимому, связано с легированием сплава 1469 Ag.

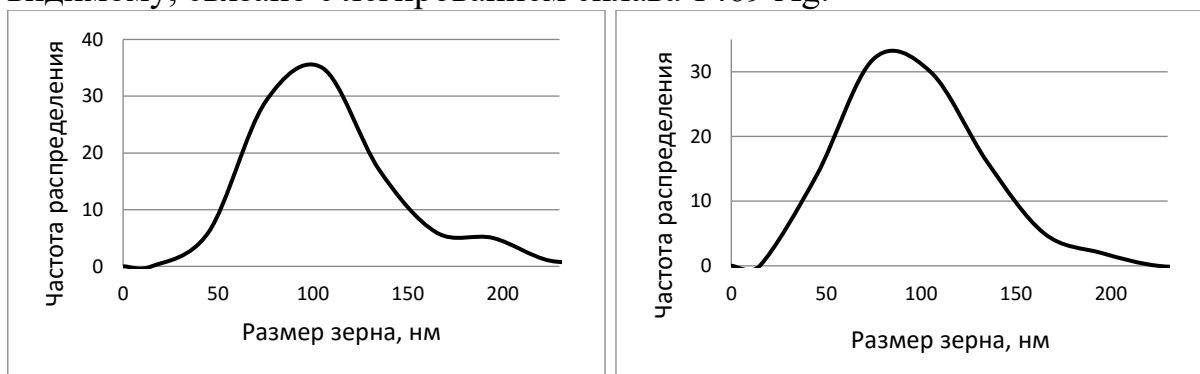


Рис. 4. Кривые частоты распределения зерен по размерам в сплаве 1469 после МПД и отжига

Таким образом, для получения в многокомпонентных стареющих алюминий-литиевых сплавах стабильной нанокристаллической структуры после МПД и последующего низкотемпературного отжига их целесообразно легировать малыми добавками — антирекристаллизационными (типа Sc) и инициирующими зарождение зернограницных выделений (типа Ag).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние интенсивной пластической деформации на образование нанокристаллической структуры и старение многокомпонентного

- алюминий-литиевого сплава с малыми добавками Sc и Mg. / Л. И. Кайгородова [и др.] // ФММ. 2011. Т.111, №1. С. 74–81.
2. Влияние мегапластической деформации на структуру и свойства сплава / Al-Li-Cu-Mg-Zr-Sc-Zn. Л. И. Кайгородова [и др.] // ФММ, в печати
  3. Структура и свойства стареющего сплава Al – Li – Cu – Zr – Sc - Ag после мегапластической деформации кручением под давлением / Л. И. Кайгородова [и др.] // ФММ. 2015. Т.116, № 4. С. 366–376.
  4. Влияние отжига на структуру и свойства сплава Al–Li–Cu–Zr–Sc–Ag, подвергнутого мегапластической деформации / Л. И. Кайгородова [и др.] // ФММ. 2015. Т. 116. № 9. С. 1–9.